

論文の内容の要旨

論文題目「強磁場下2次元電子系の量子論」

学位申請者 内田 朋久

キーワード: 2次元電子系 マグネトプラズモン 分散関係 自己無撞着線形応答近似 GaAs 半導体

現代のテクノロジーにおいて、GaAs 半導体や MOSFET 半導体に代表される半導体素子は必要不可欠な要素である。その重要な物理的諸性質には半導体中に形成される2次元平面に閉じ込められた電子多体系のダイナミクスによって決められているものが多い。その中でも、von Klitzing が MOSFET 半導体の2次元電子系で発見した整数量子ホール効果は量子論の根幹に関わる問題を含み、現代物理学の広い分野で注目を集めることになった。整数量子ホール効果の理論的研究は、多くの研究者によって行われてきた。しかし、実験を定量的に説明できる理論は Baraff と Tsui によって提唱され Toyoda 等によって発展させられた Electron Reservoir Model (ERM) だけである。ERM では、対象とする2次元電子系の外に電子溜 (Electron Reservoir, ER) の存在を考えるため、電子系の電子数とその熱力学的共役変数である化学ポテンシャルの扱いについて統計力学的に厳密な扱いが可能となる。ERM によれば、整数量子ホール効果の実験で直接制御されている熱力学変数は電子数ではなく化学ポテンシャルであって、2次元電子系の電子数密度は期待値として取り扱わなければならない。この ERM は、整数量子ホール効果の実験を非常によく説明することに成功した。しかし、Baraff と Tsui による不純物準位が ER を構成するという主張の実験的確認はできず、ER の実体が何であるかという疑問は整数量子ホール効果理論における深刻な未解決問題として残されてきた。これを解決し、整数量子ホール効果の理論を完成させたのが、2008 年から 2013 年にかけて Toyoda によって発表された理論である。この Toyoda 理論を裏付ける重要な実験が存在する。2004 年 Holland 等は強磁場下2次元電子系におけるマグネトプラズモンの分散関係に現れるプラトーを発見したが、そのメカニズムは未解決のまま残されていた。Holland 等は、彼らが発見したマグネトプラズモン分散関係プラトーと整数量子ホール効果の間には密接な関係があるだろうとの予想を述べていた。この現象は Toyoda 理論で完璧に説明できる。しかし、そのためには強磁場下2次元電子系におけるマグネトプラズモンの分散関係を解析的に求める必要がある。これが本研究の動機である。

本論文では強磁場下 2 次元電子系におけるマグネトプラズモンの理論を場の量子論を用いて構築し、その分散関係を解析的に求める。電子多体系におけるプラズモンの分散関係を計算する方法は幾つかあるが、本研究では、Toyoda による自己無撞着線形応答近似を用いた。この理論は正準形式による場の理論に基づいており理論の整合性、解析的な扱いやすさ等で他の理論形式よりも格段に優れているからである。

次に本論文の構成について述べる。第 1 章では本研究の目的と今日の物性物理学における位置づけについて述べる。

第 2 章では、まず 2 次元電子系の具体例について述べる。次に 2 次元電子系に関する第二量子化の方法を概説し、さらに第二量子化された 2 次元電子系のハミルトニアンについて議論する。最後に Semenoff モデルを用いたグラフェンのハミルトニアンを紹介する。

第 3 章では第二量子化された電子場演算子を用いて 2 次元電子系の電子密度の線形応答について議論する。ハイゼンベルグ描像における電子場演算子を用いて一般的な線形応答公式を導く理論を展開する。得られた線形応答公式を強磁場下 2 次元電子系に適用するために、強磁場下 2 次元電子系の電子場演算子を用いて遅延密度応答関数を定義する。

第 4 章ではマグネトプラズモンの分散関係を導出する。まず自己無撞着線形応答理論を強磁場下 2 次元電子系について構成する。次に第 3 章で定義した強磁場下 2 次元電子系の遅延密度応答関数を用いて自己無撞着線形応答方程式を導く。この方程式の解はマグネトプラズモンの分散関係を解析的に与える。強磁場下 2 次元電子系の遅延密度応答関数のフーリエ展開を用いて、自己無撞着線形応答方程式を解き、マグネトプラズモンの分散関係を求める。

第 5 章では、得られたマグネトプラズモンの分散関係の妥当性を検討するために実験と比較する。比較する実験結果は、Batke 等によるマグネトプラズモン振動数の磁場依存性に関するプロットである。我々は第 4 章で得たマグネトプラズモンの分散関係を実験結果と同一のグラフ上にプロットし比較した。結果、本研究で導いたマグネトプラズモンの分散関係は強磁場領域において実験結果をよく説明することに成功した。また、理論と測定結果にずれが生じる磁場の大きさについても波数依存性を定性的に示し、理論の実験への適用に一定の基準を示すことに成功した。

第 6 章では本研究の総括と今後の展望を述べる。本研究の重要な成果の一つはマグネトプラズモン分散関係におけるフェルミ分布の存在を解析的に示す式の導出である。

整数量子ホール効果の理論的説明は今日の固体電子論で最も重要な問題の一つであるが、数多いモデルの中で定量的に説明できる唯一の理論は ERM である。

本研究は、ERM をマグネトプラズモン分散関係の実験結果と直接比較する際に不可欠な理論式を導くことに成功した。量子ホール効果だけでなく、強磁場下の半導体やグラフェンにおける 2 次元電子系とレーザー等の電磁波との相互作用の実験的および理論的研究を進める上で、本研究で導いたマグネトプラズモン分散関係は重要な役割を演じてゆくことが期待される。